

EFEITO DA CONSIDERAÇÃO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR DO REVESTIMENTO NO CÁLCULO DE TENSÕES E DESLOCAMENTOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Flávio Vasconcelos de Souza

Jorge Barbosa Soares

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

No Brasil, é comum considerar-se o comportamento do revestimento asfáltico como elástico linear na análise de tensões e deslocamentos em pavimentos. Esta aproximação, entretanto, impede uma simulação dos fenômenos de trincamento por fadiga e deformação permanente, pois não considera a dependência em relação ao tempo e à taxa de aplicação da carga (ou deslocamento) apresentada pelos materiais asfálticos. A consideração do comportamento viscoelástico, no entanto, possibilita um melhor entendimento de fenômenos como trincamento por fadiga, deformação permanente e recuperação de trincas em misturas asfálticas. O presente estudo trata do cálculo de tensões e deslocamentos em pavimentos asfálticos, para condições isotérmicas, onde a camada asfáltica apresenta comportamento viscoelástico e as subcamadas são consideradas elásticas. São analisados quatro tempos de pulso de aplicação de carga semi-senoidal e um pulso de carga estático constante, com o objetivo de avaliar o efeito da velocidade do carregamento na resposta estrutural do pavimento. Fazem-se ainda algumas considerações sobre o módulo de resiliência de misturas, que vem sendo utilizado como um parâmetro puramente elástico.

ABSTRACT

In Brazil, the asphaltic layer is commonly considered linear elastic in pavement stress and displacement analyses. Such approximation precludes a simulation of fatigue cracking and permanent deformation given that it does not consider the asphaltic material dependence on time and load (or displacement) rate application. The consideration of the viscoelastic behavior of the asphaltic layer, however, provides a better understanding of several phenomena observed in asphalt mixtures such as fatigue cracking, rutting and fracture healing. The present paper is concerned with the isothermal stresses and displacements calculations in asphalt pavements considering the viscoelastic behavior of the surface layer. The load rate is analyzed using four different semi-sine loading pulse durations and one step loading duration. Furthermore, considerations are made on the resilient modulus of asphaltic mixtures, which is commonly considered to be an elastic parameter.

1. INTRODUÇÃO

Embora Boussinesq (1885) tenha originalmente solucionado o problema de um semi-espaço infinito submetido à aplicação de uma carga concentrada e, posteriormente de uma carga distribuída, as soluções do estado de tensões e deslocamentos em pavimentos foram divulgadas efetivamente por Westergaard (1926a; 1926b), que resolveu o problema de uma placa elástica suportada por uma fundação líquida (fundação de Winkler). Na década de 40, Burmister (1943) apresentou a solução analítica para sistemas de duas camadas elásticas lineares, a qual foi estendida para três camadas pelo mesmo autor (Burmister, 1945). Atualmente, com o advento do computador, as soluções de Burmister podem ser ampliadas para qualquer número de camadas (Huang, 1967; 1968).

As equações analíticas propostas por Burmister envolvem conceitos matemáticos complexos, como as funções de Bessel (Burmister, 1943; Kreyzig, 1993), não sendo, portanto, de fácil aplicação prática. Além disso, são restritas a algumas hipóteses simplificadoras, como homogeneidade, isotropia e comportamento elástico linear dos materiais, e foram desenvolvidas para um espaço semi-infinito, ou seja, todas as camadas são infinitas em sua extensão horizontal e a camada mais profunda possui espessura infinita.

Na década de 60, no entanto, Argyris e Kelsey (1960) e Melosh (1963) firmaram a base teórica do método dos elementos finitos (MEF), tornando-o uma poderosa ferramenta numérica para a solução de sistemas de equações diferenciais parciais, como é o caso das equações da teoria da elasticidade (Allen e Haisler, 1985). Visto que o estado de tensões desenvolvido em pavimentos sob condições reais é complexo, não havendo solução analítica, é comum a utilização de ferramentas numéricas, dentre as quais destaca-se o MEF, no cálculo dessas tensões. Este método possibilita a solução de sistemas em camadas com condições de contorno diferentes das assumidas por Burmister, aproximando o modelo geométrico das condições reais de campo (Duncan *et al.*, 1968). Além disso, o MEF destaca-se pela relativa simplicidade de utilização de diferentes modelos constitutivos para as diversas camadas do pavimento e de modelos de formação e propagação de trincas (Zienkiewicz, 1971; Perng, 1989).

Dados esses avanços, observa-se nas últimas décadas uma maior utilização de métodos de dimensionamento mecânicos de pavimentos, que buscam compatibilizar as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais constituintes das camadas (Motta, 1991; Huang, 1993; Medina, 1997). Para tanto, é necessário o cálculo das tensões induzidas no pavimento pela ação do tráfego e sua compatibilização com as características resistentes de cada material. O programa FEPAVE2, baseado no MEF, vem sendo bastante utilizado no Brasil para o cálculo de tensões em pavimentos asfálticos (Motta, 1991; Silva, 1995; Benevides, 2000). O FEPAVE2 assume simetria axial e área de contato pneu-pavimento circular e centrada no eixo de simetria. Além disso, todos os materiais constituintes das diversas camadas do pavimento são assumidos de comportamento elástico, seja linear ou não linear.

Sabe-se, no entanto, que os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico, ou seja, seu comportamento estrutural depende do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento) (Schapery, 1969, 1974; Christensen, 1982). A importância da consideração do comportamento viscoelástico de materiais asfálticos vem sendo ressaltada tanto em literatura nacional como internacional (Goodrich, 1991; Pinto, 1991; Park e Kim, 1998; Lee e Kim, 1998; Momm, 2001; Taira e Fabri 2001; Daniel e Kim, 2002; Soares e Souza, 2002; Souza e Soares, 2002), sendo que algumas especificações internacionais consideram a viscoelasticidade quando da caracterização reológica de materiais asfálticos, especialmente as relacionadas aos ligantes (AFNOR, 1993; SHRP, 1994; LCPC, 1997).

O objetivo do presente trabalho é mostrar o efeito da consideração do comportamento viscoelástico de revestimentos asfálticos no cálculo das tensões e deslocamentos em sistemas em camadas para condições isotérmicas. Considera-se uma geometria axissimétrica onde a carga de uma roda, cuja área de contato pneu-pavimento é assumida circular, é centrada no eixo de simetria. São consideradas quatro camadas, quais sejam, revestimento, base, subbase e subleito, sendo que as três últimas são assumidas de comportamento elástico linear e o revestimento é considerado viscoelástico linear. Em uma análise comparativa, o revestimento é considerado elástico linear, de modo a facilitar o entendimento do efeito da viscoelasticidade linear no cálculo de tensões e deslocamentos.

É importante salientar que as variações de temperatura em materiais viscoelásticos, além de induzirem tensões térmicas, provocam mudanças nas propriedades destes materiais. Entretanto, a variação de temperatura não é considerada no presente estudo, de modo a

simplificar a análise e o entendimento a respeito do efeito da consideração do comportamento viscoelástico na resposta estrutural dos pavimentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido à dependência do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento) as equações constitutivas dos materiais viscoelásticos deixam de ser algébricas, como é o caso das relações elásticas, e passam a ser representadas por integrais de convolução (Volterra, 1959; Schapery, 1974; Christensen, 1982). Para o caso uniaxial, as relações tensão-deformação dos materiais viscoelásticos lineares são dadas pelas Equações 1 e 2, abaixo.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \partial \tau \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \partial \tau \quad (2)$$

onde $E(t)$: módulo de relaxação;
 $D(t)$: função fluência (*creep compliance*);
 t : tempo contado a partir de um referencial qualquer; e
 τ : tempo contado a partir do início da aplicação da carga.

O módulo de relaxação é obtido do ensaio de relaxação, que consiste da aplicação de uma deformação uniaxial constante, ε_0 , sendo $E(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0$. Já a função fluência, é obtida através do ensaio de *creep*, que consiste da aplicação de uma tensão uniaxial constante, σ_0 , sendo $D(t) = \varepsilon(t)/\sigma_0$. Note-se que o módulo de relaxação e a função fluência não são funções recíprocas, mas relacionadas pela Equação 3 (Ferry, 1980).

$$\int_0^t E(t-\tau)D(\tau)d\tau = t \quad \text{para } t > 0 \quad (3)$$

Quando se buscam soluções analíticas para problemas viscoelásticos, é comum a utilização dos chamados princípios de correspondência elástica-viscoelástica. Um destes princípios se baseia no fato de que soluções para problemas viscoelásticos quando levadas para outro domínio matemático transformado se assemelham a soluções elásticas. Assim, a solução de um problema viscoelástico pode ser obtida a partir da solução elástica do mesmo, através da substituição das constantes elásticas pelas funções viscoelásticas transformadas multiplicadas pela variável transformada, e efetuando-se o inverso da transformada considerada (Christensen, 1982; Zhang *et al.*, 1997). A principal restrição da utilização deste princípio é que o contorno do problema (geralmente superfícies) não pode depender da variável tempo, ou seja, o tipo da condição de contorno (deslocamento ou tensão) e a região sobre a qual esta condição atua não podem mudar ao longo do tempo (Schapery, 1974; Christensen, 1982).

Um outro princípio é o princípio de correspondência elástica-viscoelástica de Schapery (Schapery, 1984). Este princípio aplica-se tanto para materiais viscoelásticos lineares como não-lineares, além de permitir a análise do desenvolvimento de danos no material (*damage growth*) (Park *et al.*, 1996; Daniel e Kim, 2002) e o fenômeno de recuperação de fissuras (*fracture healing*) (Kim, 1988; Kim *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1994; Little *et al.*, 1999). Tal princípio se baseia no conceito de pseudo-deformações, ε^R , que são representadas matematicamente sob a forma da Equação 4 para o caso uniaxial.

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \partial \tau \quad (4)$$

onde ε : deformação uniaxial; e
 E_R : módulo de referência, que é uma constante arbitrada.

Dadas as restrições das hipóteses assumidas pelos métodos de solução analítica e a complexidade da aplicação da inversa das transformadas matemáticas, mais uma vez, torna-se importante a utilização de ferramentas numéricas na busca da solução de diversos problemas de engenharia.

Uma maneira de se incorporar as relações constitutivas viscoelásticas à formulação proposta pelo MEF é incrementalizando-se tais relações em relação à variável tempo (Ghazlan *et al.*, 1995; Zocher *et al.*, 1997). A formulação aqui utilizada é aquela proposta por Zocher *et al.* (1997), a qual se baseia na incrementalização da Equação 1, sendo a taxa de variação da deformação assumida constante durante o incremento de tempo e o módulo de relaxação $E(t)$ representado por uma série de Prony para o modelo de Wiechert (ou modelo de Maxwell generalizado), de acordo com a Equação 5 e a Figura 1a.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i \cdot e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (5)$$

onde: E_∞, E_i e ρ_i : coeficientes do modelo de Wiechert (ou série de Prony);
 N : número de termos.

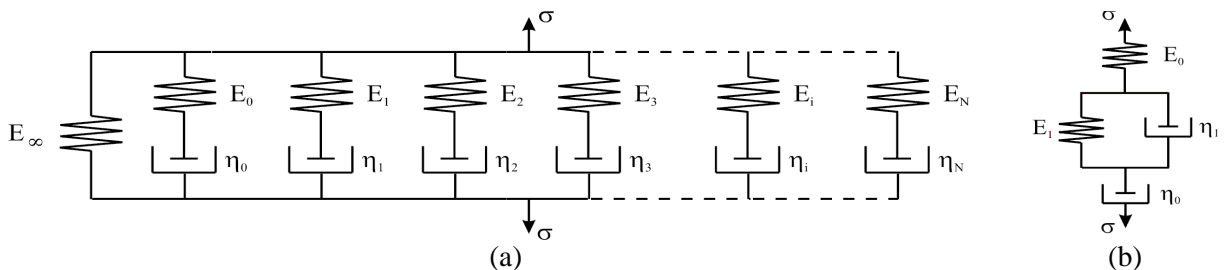


Figura 1: Modelos viscoelásticos: (a) Maxwell generalizado (Wiechert); (b) Burger

Hopman (1994) desenvolveu um programa para a solução de sistemas em camadas que considera o comportamento viscoelástico das camadas asfálticas. Este programa, batizado de VEROAD (ViscoElastic ROad Analysis Delft), se baseia na utilização da transformada de Fourier, a qual se aplica melhor a carregamentos periódicos (Drescher *et al.*, 1997), e possui a limitação de que os materiais viscoelásticos devem ser caracterizados através do modelo de Burger (Figura 1b). Park e Kim (1998), baseados na integral de superposição de Boltzmann, desenvolveram uma metodologia aplicável a sistemas em camadas onde todos os materiais são considerados viscoelásticos. De acordo com Huang (1993), os programas VESYS e KENLAYER utilizam o método da colocação para obter soluções viscoelásticas aproximadas a partir das soluções elásticas. Estas soluções viscoelásticas aproximadas, conhecidas como soluções quase-elásticas (*quasi-elastic solutions*), baseiam-se na hipótese de reciprocidade entre as funções $E(t)$ e $D(t)$, que, de acordo com Schapery (1962, 1967), é válida apenas quando o gráfico de D (ou E) versus $\log t$ apresenta pequenas curvaturas. Vale ressaltar que tanto Park e Kim (1998), como os programas VEROAD, VESYS e KENLAYER, não utilizam a formulação do MEF no desenvolvimento dos seus modelos.

3. GEOMETRIA, MATERIAIS E CARREGAMENTO USADOS NO PROBLEMA

Na análise realizada no presente estudo, as espessuras assumidas para as camadas de revestimento, base, subbase e subleito são 5, 15, 20 e 400cm, respectivamente, e o limite radial assumido é de 200cm. Tais dimensões foram adotadas assumindo-se um raio da área de contato de 10,8cm e seguindo-se a recomendação de Duncan (1968) de um limite radial de 20 vezes o raio da área de carregamento e espessura da última camada de 40 vezes o mesmo raio, aproximadamente. A Figura 2 apresenta a geometria do problema, as condições de contorno e a malha de elementos finitos utilizada. A malha foi gerada automaticamente pelo pré-processador descrito em Evangelista Jr *et al.* (2003), utilizando-se elementos quadriláteros de quatro nós com quatro pontos de integração de Gauss, onde as tensões são calculadas. Um total de 1760 elementos foi usado na discretização do meio físico.

Para reduzir as discontinuidades de tensão nas bordas dos elementos, adotou-se como resultado de tensão em cada nó a média das tensões obtidas para os pontos de Gauss mais próximos de cada nó, sendo que as tensões em qualquer localização dentro do elemento podem ser calculadas através dos resultados de tensão nodais e das funções de forma usadas na formulação do elemento (Bathe, 1996).

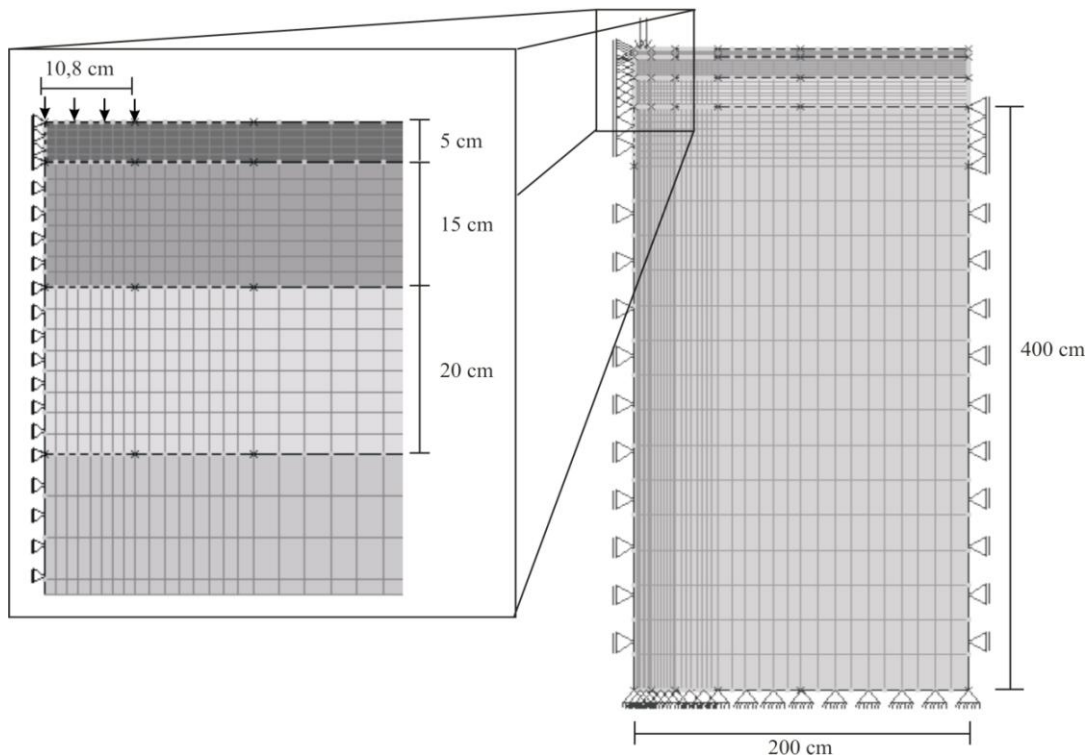


Figura 2: Modelo geométrico e malha de elementos finitos

Quanto às propriedades elásticas lineares dos materiais de base, subbase e subleito, baseando-se no estudo de Soares *et al.* (2000), assumem-se, respectivamente, os valores de 300, 200 e 100, para os módulos de Young (em MPa), e 0,3 para os coeficientes de Poisson das subcamadas. No caso do revestimento asfáltico, as propriedades viscoelásticas, quais sejam, coeficientes das séries de Prony para o módulo de relaxação (Equação 5) e para a função fluência (Souza e Soares, 2002), foram extraídas de Gibson *et al.* (2002) e são apresentadas na Tabela 1. Assume-se ainda um coeficiente de Poisson constante de 0,4 para a camada de CBUQ.

Tabela 1: Propriedades viscoelásticas para um CBUQ à temperatura de referência de 25°C (Gibson *et al.*, 2002)

i / j	Módulo de relaxação		Função fluência	
	E_i (MPa)	ρ_i (segundos)	D_j (MPa ⁻¹)	τ_j (segundos)
	$E_\infty = 412,8$	-	$D_0 = 3,459E-05$	-
1	1,430E+01	1,500E+07	9,042E-05	1,125E+07
2	3,210E+01	8,005E+05	1,885E-04	6,004E+05
3	7,420E+01	4,272E+04	3,525E-04	3,204E+04
4	1,796E+02	2,280E+03	5,769E-04	1,710E+03
5	4,588E+02	1,217E+02	5,955E-04	9,125E+01
6	1,232E+03	6,493E+00	3,396E-04	4,870E+00
7	2,956E+03	3,465E-01	1,405E-04	2,599E-01
8	5,286E+03	1,849E-02	5,670E-05	1,387E-02
9	6,531E+03	9,869E-04	2,367E-05	7,402E-04
10	5,727E+03	5,267E-05	1,172E-05	3,950E-05
11	3,848E+03	2,811E-06	4,222E-06	2,108E-06
12	2,160E+03	1,500E-07	-6,095E-08	1,125E-07

3.1. Cálculo do módulo resiliente da mistura asfáltica

Para que se possa comparar a resposta estrutural do pavimento em análise considerando-se o revestimento asfáltico de comportamento viscoelástico linear com a resposta do mesmo para o caso de se considerar o revestimento de comportamento elástico linear, é necessário que se determine o valor de módulo resiliente (MR) da mistura usada.

Como os valores apresentados na Tabela 1 foram extraídos da literatura, não é possível se realizar ensaios laboratoriais para a mistura em questão. No entanto, é importante observar que uma vez determinadas as propriedades fundamentais do material, é possível inferir-se a resposta deste sob qualquer tipo e forma de sollicitação (Christensen, 1982; Allen e Haisler, 1985; Souza e Soares, 2002).

Embora no Brasil a determinação do MR através do ensaio de compressão diametral seja mais comum (DNER, 1994), o MR também pode ser obtido do ensaio de compressão uniaxial (Huang, 1993). Assim sendo, adotou-se o MR uniaxial, pois para a análise estrutural de meios considerados isotrópicos é necessária apenas a determinação das propriedades do material em uma única direção (sollicitação uniaxial), já que as propriedades são assumidas independentes da direção (Allen e Haisler, 1985).

Considerando-se, portanto, uma sollicitação uniaxial semi-senoidal com 0,1s de aplicação de carga, 0,9s de repouso e pico de tensão de 0,1MPa, e utilizando-se as equações de previsão de deformação propostas por Souza e Soares (2002), dados os termos da função fluência mostrada na Tabela 1, obtém-se os resultados de deformação mostrados na Figura 3.

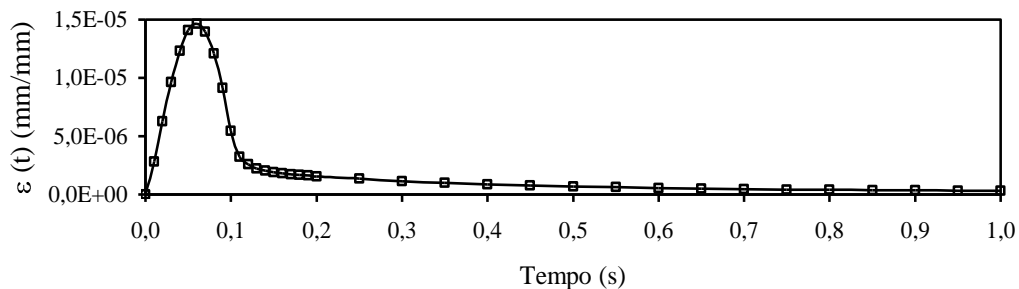


Figura 3: Simulação matemática do ensaio de MR uniaxial para a mistura estudada

Assim sendo, pode-se calcular o valor do MR uniaxial (Huang, 1993) da mistura através da seguinte equação:

$$MR_{CBUQ} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t = 1s)} = 6.978\text{MPa} \quad (6)$$

onde: σ_0 : pico da tensão solicitante;
 ε_{\max} : máxima deformação sofrida ao longo do ciclo de carga;
 $\varepsilon(t = 1s)$: deformação no final do ciclo, $t = 1,0s$;
 $\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t = 1s)$: deformação recuperável.

3.2. Carregamento

A passagem dos veículos é, em geral, a principal solicitação sofrida por um pavimento. A quantificação da distribuição de carga transmitida ao pavimento pelos pneus e da área sobre a qual esta carga é aplicada é fator determinante para a análise de tensões nos pavimentos. Uma maneira de se calcular a área de contato e a distribuição da carga nesta área de forma mais precisa seria através da modelagem do próprio pneu (Schapery e Tielking, 1977; Tielking, 1983). Tielking e Roberts (1987) usaram um modelo baseado no MEF para determinar a distribuição da pressão na área de contato bem como a geometria da área de contato. O mesmo trabalho mostra que a pressão de contato não é igual à pressão de inflação do pneu e, além disso, a distribuição da pressão de contato não é uniforme.

Dada a geometria axissimétrica aqui assumida, adotou-se, por simplificação, uma pressão de contato de 0,56MPa distribuída uniformemente em uma área circular de 10,8cm de raio, o que corresponderia a uma roda de um eixo padrão de 8,2tf. Embora o modelo geométrico usado não permita que a carga se desloque no espaço, a passagem da roda sobre o pavimento é simulada através da aplicação de pulsos de carga semi-senoidais (Figura 4a). Foram adotados quatro tempos de pulso de aplicação de carga na superfície, quais sejam, 0,01s; 0,03s; 0,1s e 1,0s. De acordo com o gráfico de Barksdale e Hicks (1973) transcrito em Medina (1997), um pulso de 0,01s corresponde a uma velocidade da ordem de 100km/h; um pulso de 0,03s a uma velocidade de 48km/h; um pulso de 0,1s a aproximadamente 10km/h e um pulso de 1,0s a cerca de 1km/h. Para todos os pulsos adotados, assumiu-se um pico de 0,56MPa. Além disso, analisa-se também um carregamento estático constante (aplicado instantaneamente), conforme Figura 4b, de 0,56MPa atuando sobre o pavimento durante 1,0s.

Note-se que a passagem de uma roda não provoca a aplicação instantânea da carga, como propõe a Figura 4b, mas uma aplicação progressiva onde o pulso pode ser aproximado por uma função semi-senoidal tanto no início como no fim da aplicação de carga, e quanto menor a velocidade do veículo, menor é a taxa de aplicação da carga. Assim sendo, a Figura 4b não representa o carregamento gerado pelo tráfego de veículos. Entretanto, este tipo de carregamento é analisado por questões de entendimento teórico do modelo viscoelástico.



Figura 4: Tipos de carregamento analisados: (a) pulso semi-senoidal; (b) estático constante

4. ANÁLISE

Definidos o modelo geométrico, as propriedades dos materiais e as condições de contorno (deslocamentos e carregamento), pode-se proceder ao cálculo das tensões e deslocamentos induzidos no pavimento, considerando-se o comportamento do revestimento asfáltico tanto viscoelástico linear como elástico linear. Os parâmetros adotados para comparação são a deflexão máxima de superfície (d_0), a tensão horizontal no fundo do revestimento (σ_{xx-R}) e a tensão vertical no topo do subleito (σ_{yy-SL}).

Sabendo-se que na incrementalização da Equação 1 assumiu-se uma taxa de deformação constante, procurou-se definir, para cada tipo de carregamento, incrementos de tempo curtos o bastante de modo que a taxa de deformação durante cada incremento de tempo seja aproximadamente constante. Note-se que, para os intervalos de tempo onde a curvatura do histórico de deformação é mais acentuada, necessita-se de incrementos de tempo menores para que a taxa de deformação possa ser considerada constante durante este intervalo, mas para outros intervalos pode-se usar incrementos de tempo maiores. A Tabela 2 apresenta os incrementos de tempo adotados para cada tempo de carregamento (t_c). Vale salientar que neste estudo não foi realizada uma análise de sensibilidade com relação aos incrementos de tempo utilizados, motivo pelo qual adotaram-se pequenos incrementos de tempo.

Tabela 2: Incrementos de tempo usados para cada tempo de carregamento

t_c (s)	Intervalo de tempo (s)	Incremento de tempo (s)
0,01	0 – 0,02	0,0002
	0,02 – 0,03	0,0005
	0,03 – 0,04	0,01
	0,04 – 4,04	1,0
0,03	0 – 0,1	0,001
	0,1 – 0,5	0,1
	0,5 – 4,5	1,0
0,1	0 – 0,2	0,002
	0,2 – 0,3	0,005
	0,3 – 0,4	0,1
	0,4 – 4,4	1,0
1,0	0 – 2,0	0,02
	2,0 – 3,0	0,05
	3,0 – 4,0	0,1

Para o caso da aplicação de uma carga estática constante ($t_c = 1$ s), foram usados incrementos de tempo de 1×10^{-9} s tanto no início como no fim do carregamento com o objetivo de descrever adequadamente a descontinuidade existente nestes pontos. Este valor foi usado devido ao fato de que o domínio de variação de uma função exponencial simples é de aproximadamente duas ordens de grandeza (em torno de ρ_1 , ou τ_1), e como o menor coeficiente ρ_1 (ou τ_1) dado na Tabela 1 é da ordem de 1×10^{-7} s, adotou-se o valor de 1×10^{-9} s.

Para permitir uma melhor visualização e comparação dos resultados, definiu-se uma variável normalizada, t' , dada por:

$$t' = \frac{t}{t_c} \quad (7)$$

onde: t : tempo (quantidade física); e
 t_c : tempo total do pulso de aplicação de carga.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os resultados de d_0 , σ_{xx-R} e σ_{yy-SL} . Nota-se que o caso elástico com o módulo de elasticidade igual ao MR se aproxima do caso viscoelástico para $t_c = 0,1s$, o que era esperado, pois o MR é determinado para $t_c = 0,1s$. Isto se deve ao fato de que o MR dado pela Equação 6 não representa um parâmetro puramente elástico, uma vez que durante o pulso de carregamento desenvolvem-se deformações viscoelásticas que são contabilizadas como deformações elásticas no cálculo do MR. Note-se que na determinação do MR as deformações totais (Figura 8) são assumidas elásticas. Entretanto, a Figura 8 mostra que a contribuição puramente elástica nas deformações totais é pequena em relação à viscoelástica.

A propriedade puramente elástica, no entanto, está relacionada ao parâmetro D_0 da função fluência (para o caso de tensão controlada). Para a mistura aqui analisada, o módulo puramente elástico correspondente é $E_0 = 1/D_0 = 28.910MPa$, portanto, bastante superior a valor $6.978MPa$ determinado pela Equação 6 que inclui as deformações viscoelásticas.

É importante ressaltar que, de acordo com a teoria da viscoelasticidade, quando o tempo de aplicação da carga (ou deslocamento) tende a zero (aplicação instantânea), a resposta do material no instante da aplicação tende para a resposta puramente elástica (Christensen, 1982). Desta forma, e a partir das Figuras 5, 6 e 7, pode-se perceber que o MR não é um parâmetro puramente elástico. Um maior detalhamento do ensaio de MR à luz da teoria da viscoelasticidade linear pode ser encontrado em Soares e Souza (2003).

Note-se ainda que após a aplicação do pulso de carga, para o caso elástico, a estrutura retorna ao seu estado inicial instantaneamente, mas para os casos viscoelásticos, a estrutura como um todo é amortecida devido ao comportamento viscoelástico da camada asfáltica, o que faz com que a estrutura não retorne instantaneamente ao seu estado inicial (Figuras 5, 6 e 7).

Desta forma, num sistema em camadas no qual as subcamadas são assumidas elásticas e o revestimento é assumido viscoelástico, à medida que o carregamento é reduzido, as subcamadas tendem a retornar instantaneamente ao seu estado inicial, enquanto o revestimento tende a retornar progressivamente. Isto faz com que as subcamadas passem a atuar no sentido de comprimir as fibras inferiores do revestimento radialmente próximas ao carregamento. Assim sendo, num determinado instante de tempo, as fibras do fundo do revestimento, outrora sob um estado de tração, podem passar para um estado de compressão devido à ação das subcamadas, como mostra a Figura 6. Este estado de compressão pode implicar numa maior vida de fadiga da camada de superfície, dado que o fenômeno de recuperação de trincas (*healing*) se dá mais rapidamente caso as faces da trinca estejam comprimidas uma contra a outra (Schapery, 1989; Kim *et al.*, 1990). Este aspecto, no entanto, não é observado quando se considera o revestimento de comportamento elástico.

Vale ressaltar que as tensões horizontais no fundo do revestimento aqui analisadas pertencem ao ponto mais próximo do eixo de simetria. Note-se ainda que para pontos localizados no fundo do revestimento, porém a uma determinada distância radial do carregamento, as tensões inicialmente induzidas são de compressão, como para o caso elástico (Pinto, 1991), mas podem passar para um estado de tração devido ao comportamento viscoelástico da camada de superfície.

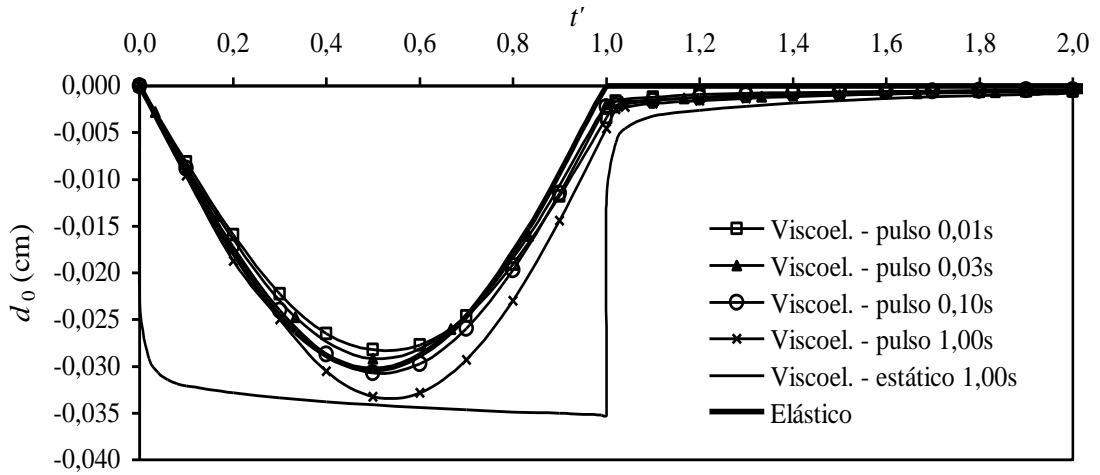


Figura 5: Deflexão máxima de superfície (centro da área de carregamento)

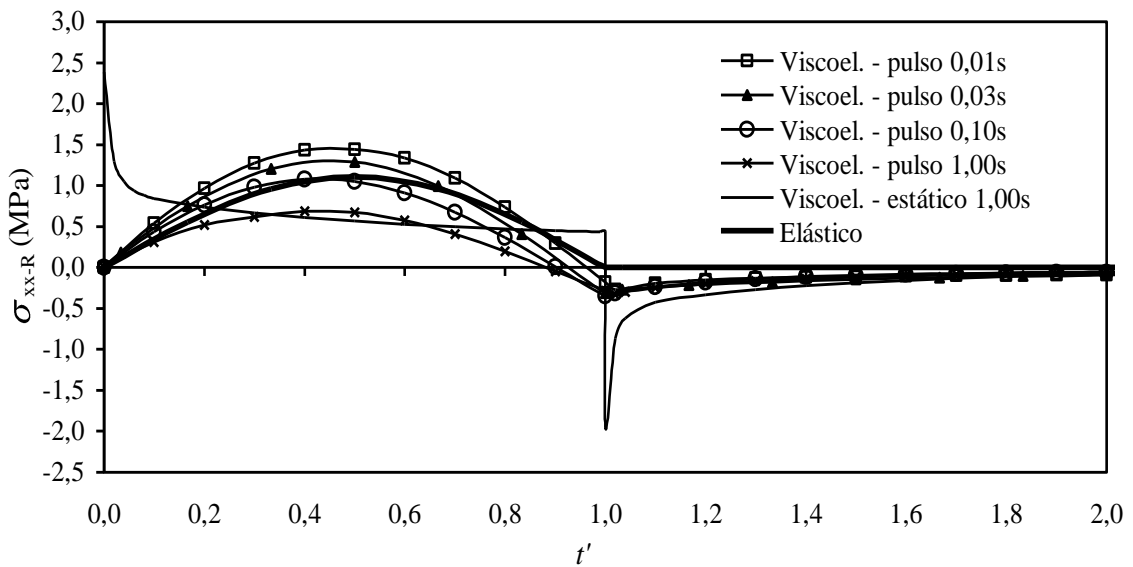


Figura 6: Tensão horizontal no fundo do revestimento asfáltico

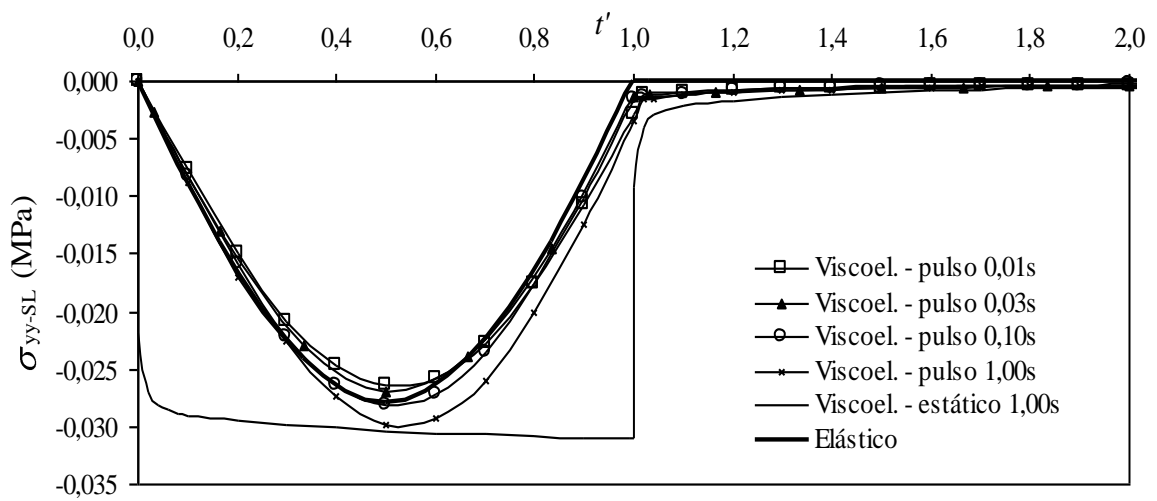


Figura 7: Tensão vertical no topo do subleito

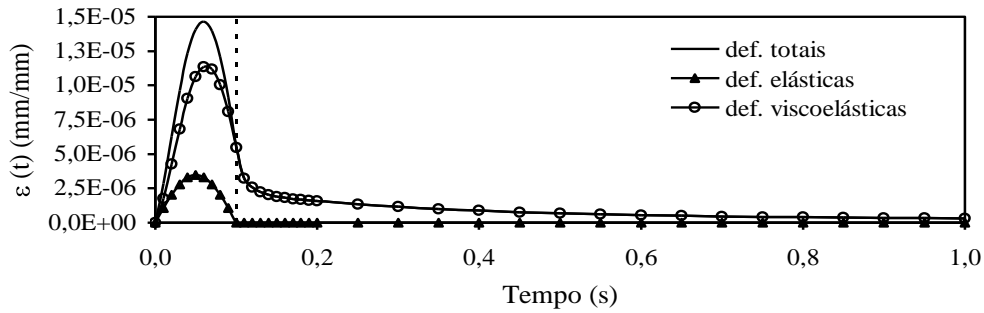


Figura 8: Decomposição das deformações desenvolvidas no ensaio de MR

A partir da Figura 5, verifica-se que para maiores tempos de aplicação de carga, obtém-se maiores deflexões, o que ocorre devido ao comportamento viscoelástico da camada de revestimento. Da Figura 6, percebe-se que quanto maior é o tempo de pulso, menor é a tensão horizontal no fundo do revestimento. Isto ocorre devido ao fato de que para maiores tempos de pulso e um mesmo pico de pressão, há uma menor taxa de aplicação da pressão na superfície do revestimento e, conseqüentemente, uma menor taxa de variação da deformação horizontal no fundo do revestimento, o que provoca menores tensões horizontais. Finalmente, observa-se da Figura 7 que a tensão vertical no topo do subleito segue a tendência das deflexões verticais na superfície (Figura 5).

Para o caso de um carregamento estático constante ($t_c = 1s$), observam-se maiores deflexões e maiores tensões verticais no topo do subleito do que no caso senoidal com $t_c = 1s$, o que era esperado da teoria da viscoelasticidade (Christensen, 1982). Observam-se, também, maiores tensões de tração (início do carregamento), bem como maiores tensões de compressão (início do descarregamento), devido às discontinuidades existentes nesses instantes de tempo.

A Figura 9 mostra as bacias de deflexão para os casos viscoelásticos considerando-se um tempo de aproximadamente 3s após o término do carregamento. Embora a Figura 9 não represente os valores de deformação permanente, esta fornece dados indicativos, como quanto maior o tempo de aplicação de carga, maior o potencial de deformação permanente. Além disso, pode-se observar uma semelhança entre o perfil mostrado na Figura 9 e aquele comumente observado nas trilhas de roda de pavimentos asfálticos.

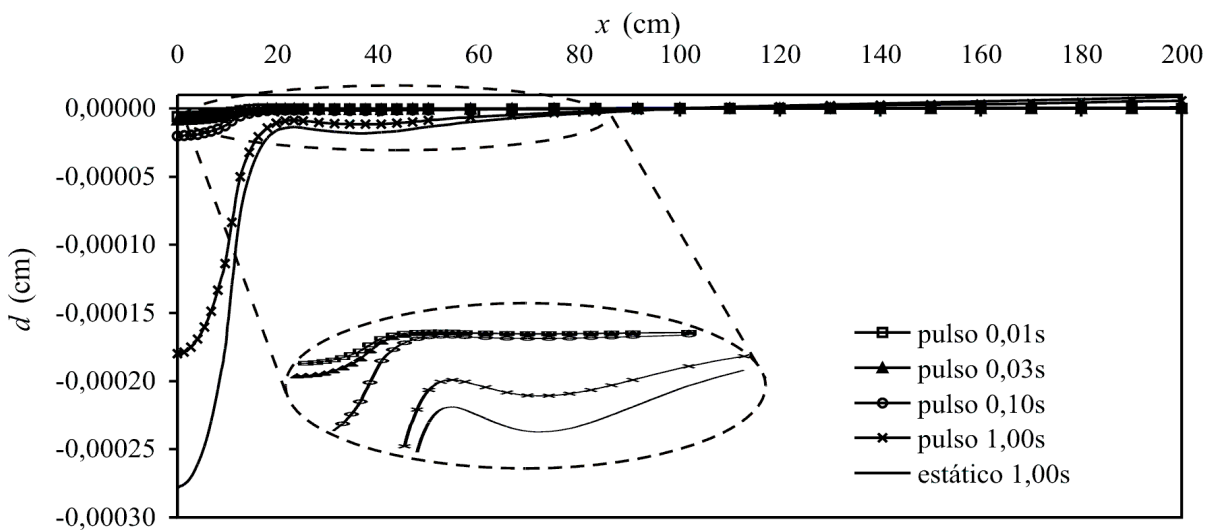


Figura 9: Bacias de deflexão para casos viscoelásticos (tempo de repouso de 3s)

Para avaliar mais precisamente a deformação permanente, seria necessária uma análise onde o tempo de repouso fosse da ordem de minutos ou horas. Este tipo de análise ainda não é computacionalmente viável. Para os casos aqui estudados, por exemplo, onde o intervalo de repouso, de cerca de 3s, foi discretizado em 130 incrementos de tempo, em média, o tempo computacional gasto foi de 35 a 40 minutos, considerando-se um processador Pentium IVTM de 1,8GHz e 512MB de memória RAM.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho enfatiza a importância da consideração do comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos, tanto na caracterização de misturas asfálticas como na análise estrutural de pavimentos, pois a consideração do real comportamento dos materiais permite um melhor entendimento dos fenômenos observados em campo. Algumas considerações sobre o ensaio de módulo de resiliência são discutidas à luz da teoria da viscoelasticidade, mostrando-se que este não é um parâmetro puramente elástico, o que é confirmado pelas análises numéricas.

Os resultados apresentados mostram a influência do tempo e da taxa de aplicação de carga no cálculo de tensões e deslocamentos em pavimentos asfálticos. Observou-se que, quando se considera o comportamento viscoelástico do revestimento, a resposta do pavimento como um todo depende do tempo e da taxa de aplicação de carga. Além disso, observou-se que, para os casos analisados, a tensão horizontal no fundo do revestimento viscoelástico passa a ser compressiva num determinado instante próximo ao final da aplicação do pulso de carga devido à ação das subcamadas assumidas elásticas.

Agradecimentos

À equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, LMP/DET/UFC. Os autores agradecem ao CNPq-Brasil pelas respectivas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFNOR (1993) *AFNOR-NF-P-98-260-1 – Essais Relatifs aux Chaussées – Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Détermination du Module Complexe par Flexion Sinusoïdale*. Association Française de Normalisation – AFNOR, França.
- Allen, D. H. e Haisler, W. E. (1985) *Introduction to Aerospace Structural Analysis*. John Wiley & Sons, USA.
- Argyris, J. H. e Kelsey, S. (1960) *Energy Theorems and Structural Analysis*, Butterworth Scientific Publications, London.
- Barksdale, R. D. e Hicks, R. G. (1973) Material Characterization and Layered Theory for Use in Fatigue Analyses. *Special Report No.140*, HRB, pp. 20-48. Washington, D.C.
- Bathe, K-J (1996) *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall, Inc., USA.
- Benevides, S. A. S. (2000) Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos Asfálticos – Método Tradicional do DNER e Método de Resiliência da COPPE. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Boussinesq, J. (1885) *Application des Potentiels a l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solids Elastiques*, Gauthier-Villars, Paris.
- Burmister, D. M. (1943) The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 23, pp. 126-144.
- Burmister, D. M. (1945) The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. *Journal of Applied Physics*, Vol. 16, pp. 84-94, 126-127, 296-302.
- Christensen, R. M. (1982) *Theory of Viscoelasticity* (2^a ed.). Academic, New York.
- Daniel, J. S. e Kim, Y. R. (2002) Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure using a Viscoelastic, Continuum Damage Model. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT.
- DNER (1994) Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 133/94, Brasil.

- Drescher, A.; Newcomb, D. E. e Zhang, W. (1997) Interpretation of the Indirect Tension Test Based on Viscoelasticity. *Preprint of the 76th Annual Transportation Research Board Meeting*, artigo n° 970962, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Duncan, J.M., Monismith, C.L. e Wilson, E.L. (1968) Finite Element Analysis of Pavements. *HRR 228*.
- Evangelista Jr, F., Silva, E. R. A. e Soares, J. B. (2003) Modelagem Computacional de Pavimentos Asfálticos - Integração entre Interface Gráfica e Programas de Análise. *Artigo submetido ao XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET.
- Ferry, J. D. (1980) *Viscoelastic Properties of Polymers* (3ª ed.). Wiley, New York.
- Ghazlan, G., Caperaa, S. e Petit, C. (1995) An Incremental Formulation for the Linear Analysis of Thin Viscoelastic Structures using Generalized Variables. *International J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 38, pp. 3315-3333.
- Gibson, N. H., Schwartz, C. W., Schapery, R. A. e Witczak, M. W. (2002) Viscoelastic, Viscoplastic, and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression. *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*.
- Goodrich, J. L. (1991) Asphaltic Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 60, p. 80-120.
- Hopman, P. C. (1994) VEROAD: A Linear Visco-Elastic Multilayer Program for the Calculation of Stresses, Strains and Displacements in Asphaltic Road Constructions: A Visco-Elastic Multilayer System. *Delft University of Technology*, The Netherlands.
- Huang, Y. H. (1967) Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems under Circular Loaded Areas. *Proceedings, 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, pp. 225-244.
- Huang, Y. H. (1968) Stresses and Displacements in Nonlinear Soil Media. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM1, pp. 1-19.
- Huang, Y. H. (1993) *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Kim, Y. R. (1988) Evaluation of Healing and Constitutive Modeling of Asphalt Concrete by Means of the Theory of Nonlinear Viscoelasticity and Damage Mechanics. Tese de Doutorado, Texas A & M University, Estados Unidos.
- Kim, Y. R., Little, D. N. e Benson, F. C. (1990) Chemical and Mechanical Evaluation on Healing Mechanism of Asphalt Concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 59, p. 240-275.
- Kim, Y. R., Whitmoyer, S. L. e Little, D. N. (1994) Healing in Asphalt Concrete Pavements: Is it Real?. *Transportation Research Record* n° 1454, Transportation Research Board, p. 89-96.
- Kreyszig, E. (1993) *Advanced Engineering Mathematics* (7ª ed.). John Wiley & Sons, USA.
- LCPC (1997) *French Design Manual for Pavement Structure - Guide Technique*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Services d'Études Techniques des Routes et Eutoroutes, n° 502 707, França.
- Lee, H. J. e Kim, Y. R. (1998) Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n° 1, p. 32-40.
- Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D. e Kim, Y. R. (1999) An Analysis of the Mechanism of Microdamage Healing Based on the Application of Micromechanics First Principles of Fracture and Healing. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 68, p. 501-542.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*, 1a. ed., Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ.
- Melosh, R. J. (1963) Basis for Derivation of Matrices for the Direct Stiffness Method. *Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 1, No. 7, pp. 1631-1637.
- Momm, L. (2001) Comportamento Viscoelástico do Concreto Asfáltico. *Anais da 33ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPV, Florianópolis, p. 471-487.
- Motta, L. M. G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Park, S. W. e Kim, Y. R. (1998) Analysis of Layered Viscoelastic System with Transient Temperatures. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n° 2, p. 223-231.
- Park, S. W., Kim, Y. R. e Schapery, R. A. (1996) A Viscoelastic Continuum Damage Model and its Application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete. *Mechanics of Materials*, v. 24, n° 4, p. 241-255.
- Perng, J-D. (1989) Analysis of crack propagation in asphalt concrete using a cohesive crack model. PhD dissertation, Ohio State University.
- Pinto, S. (1991) Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Schapery, R. A. (1962) Approximate Methods of Transform Inversion for Viscoelastic Stress Analysis. *Proceedings of the 4th U.S. Congress Appl. Mech.* ASME, p. 1075-1086.
- Schapery, R. A. (1967) Stress Analysis of Viscoelastic Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, v. 1, p. 228-267.

- Schapery, R. A. (1969) On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials. *Polymer Engineering and Science*, v. 9, p. 295-310.
- Schapery, R. A. (1974) Viscoelastic behavior and Analysis of Composite Materials. *In: Sendeckyj, G. P. (eds) Mechanics of Composite Materials*. New York, USA.
- Schapery, R. A. (1984) Correspondence Principles and a Generalized J-integral for Large Deformation and Fracture Analysis of Viscoelastic Media. *International Journal of Fracture*, v. 25, p. 195-223.
- Schapery, R. A. (1989) On the Mechanics of Crack Closing and Bonding in Linear Viscoelastic Media. *International Journal of Fracture* 39, pp. 163-189.
- Schapery, R. A. e Tielking, J. T. (1977) Investigation of Tire-Pavement Interaction during Maneuvering, Vol. 1 - Theory and results. *Report No. FHWA-RD-78-72*, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- SHRP (1994) SHRP-A-415 – *Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes*. Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Silva, P. D. E. A. (1995) Contribuição para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis. Tese de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Soares, J. B., Motta, L. M. G. e Benevides, S. A. S. (2000) Dimensionamento Mecânico de Reforço Considerando Alternativa de Base com Revestimento Fresado Incorporado. *Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico*, São Paulo.
- Soares, J. B. e Souza, F. V. (2002) Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. Anais do 16º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro.
- Soares, J. B. e Souza, F. V. (2003) Considerações sobre Módulo Resiliente e Módulo Dinâmico em Misturas Asfálticas com Base na Teoria da Viscoelasticidade. *Artigo submetido ao XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*.
- Souza, F. V. e Soares, J. B. (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a partir dos Resultados do Ensaio de Creep Estático. Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, p. 29-41.
- Taira, C. e Fabbri, G. T. P. (2001) Modelação Viscoelástica de Ensaio de Fluência Estática e Dinâmica de Misturas Asfálticas com Asfaltos Convencional e Modificado por Polímero SBS. Anais da 33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Florianópolis, p. 250-265.
- Tielking, J. T. (1983) A Finite Element Tire Model. *Tire Sci. and Tech.*, 11(1-4), pp. 50-63.
- Tielking, J. T. e Roberts, F. L. (1987) Tire Contact Pressure and its Effect on Pavement Strain. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 113, No. 1, ASCE.
- Volterra, V. (1959) *Theory of Functionals and of Integral and Integro-differential Equations*, Dover Publications, Inc., New York.
- Westergaard, H. M. (1926a) Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due to Variations of Temperature. *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 6, pp. 201-215.
- Westergaard, H. M. (1926b) Stresses in Concrete Pavement Computed by Theoretical Analysis. *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 7, pp. 25-35.
- Zhang, W.; Drescher, A. e Newcomb, D. E. (1997) Viscoelastic Analysis of Diametral Compression of Asphalt Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 123, p. 596-603.
- Zienkiewicz, O. C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*. 2ª ed., McGraw-Hill Book Company, London.
- Zocher, M. A., Groves, S. E. e Allen, D. H. (1997) Three-Dimensional Finite Element Formulation for Thermoviscoelastic Orthotropic Media. *Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 2267-2288.

Endereço dos autores:

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/ N°, Departamento de Engenharia de Transportes, DET Bloco: 703 CEP: 60.455-760, Fortaleza/CE - Brasil. e-mail: flaviouvs@det.ufc.br, jsoares@det.ufc.br